

CapstanCrunch:具有用户提供的力反馈的触觉VR控制器

迈克-辛克莱 (Mike
Sinclair
sinclair@microsoft.com

伊亚尔-奥费克
eyalofek@microsoft.com

Mar Gonzalez-Franco
margon@microsoft.com

克里斯蒂安-霍尔茨
cholz@microsoft.com

美国华盛顿州雷德
蒙市微软研究院

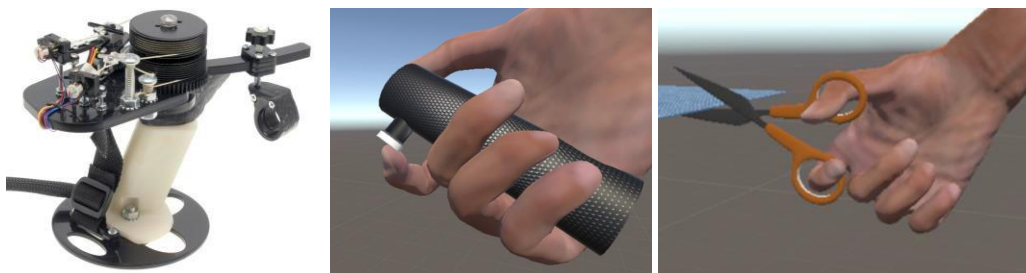


图1: CapstanCrunch是一个触觉控制器, 可以在虚拟现实呈现触摸和抓握的触觉感受。CapstanCrunch在触摸和抓握过程中支持人类尺度的力量, 可以抵御用户高达20N的抓握力。基于摩擦的绞盘制动机制放大了小型电机的力, 从而形成了一个集成的、以手掌为基础的控制设计, 用于互动。该控制器可以呈现复杂的触觉事件, 表现出可变的硬度和顺应性。

ABSTRACT

我们介绍CapstanCrunch, 一个抗力的、以手掌为基础的触觉控制器, 为在VR环境中触摸和抓取刚性和顺应性物体提供触觉反馈。与以前的控制器相比, CapstanCrunch不需要使用大型的、高力的、耗电的和昂贵的执行器就能呈现出人类规模的力量。相反, CapstanCrunch集成了一个基于摩擦的绞盘加绳索的可变阻力制动机制, 由一个小型内部马达动态控制。绞盘机制将电机的力放大约40倍, 作为输出的电阻力。与有源力控制装置相比, 它成本低、电功率低、坚固、安全、快速和安静, 同时为用户互动提供高力控制。我们描述了CapstanCrunch的设计和实现, 并演示了它在一系列VR场景中的应用。最后, 我们在两项用户研究中评估了CapstanCrunch的性能, 并将我们的控制器与具有以下能力的主动触觉控制器进行比较

在收到明确指示之前, 请勿修改此文本块。允许为个人或课堂使用本作品的全部或部分内容制作数字或硬拷贝, 但不得以营利或商业利益为目的制作或分发拷贝, 且拷贝首页须注明本通知和完整的引文。除作者外, 本作品中其他部分的版权必须得到尊重。允许摘录并注明出处。以其他方式复制, 或重新发表, 张贴在服务器上或重新分发到名单上, 需要事先获得具体许可和/或付费。请从Permissions@acm.org。CONF '22, 2022年1月1日-12月31日, Authorberg. 版权由所有者/作者持有。出版授权给ACM。ACM 978-1-xxxx-yyyy-z/zz/zz...\$zz.00. 唯一的doi字符串将被放在这里

以模拟不同程度的令人信服的物体刚性和/或顺应性。

作者关键词

触觉; 虚拟现实, 电阻力; 刹车绞盘。

CCS概念

硬件 - 触觉设备

简介

在现实生活中, 我们用手来与物体互动。我们伸出手去触摸、抓取、操纵和释放物体。然而, 在虚拟现实(VR)中, 与虚拟物体进行如此精细的互动在今天通常是不可能的。通常用于交互的市售VR控制器缺乏渲染真实的触觉反馈和支持这种自然使用的能力[8]。

在VR中现实交互的背景下, 对触觉控制器的研究最近变得很流行, 并产生了各种原型, 与手套的触觉渲染能力相竞争[11,26,31]。为了在与虚拟物体交互时提供更自然的触觉体验, 个别控制器被设计成对触摸[7,17,41]、拖动[14,37,48]、单手抓取[15-17]和双手抓取[43,45]做出反馈。所有这些控制器都包含复杂的机制, 以产生合理保真的触觉感受。

为虚拟物体成功呈现触觉的主要制约因素是, 控制器必须在交互过程中产生和承受人类规模的力, 并坚持呈现反馈, 特别是在抓取和挤压物体时, 控制器上的力是最大的。在手持设备上实现如此大的力量

控制器是具有挑战性的，特别是因为这些设备没有接地。

研究人员已经推出了各种能够提供强抓取反馈的控制器。一种解决方案是使用带有强大的伺服电机的主动机构（例如CLAW[17]），这导致了一个沉重、昂贵、不健全和耗电的设计。另一种方法是用制动器来抵抗用户施加的力，并在可控点上停止输入运动（如Wolverine [16], Gravity [15]），它可以承受高力，但在某一点上锁住抓取，需要手动释放。这种开关锁对于抓取刚性物体是很好的，但对于呈现顺应性物体或需要计算机控制释放的刚性物体（如粉碎一个罐子或鸡蛋）来说就显得落后了。

在本文中，我们提出了一个可以承受人类规模力量的线性刹车控制器[16]。CapstanCrunch（图1）是一个触觉反馈设备，它使用可控的刹车技术，在不同的硬度和/或顺应性水平上提供抓握反馈，并能维持高达20N的力。用于触觉的电阻设备在稳定性、安全性、电力需求、复杂性、延迟、每个设备的重量和成本等方面都比主动直接电机触觉设备有优势。我们的控制器使用一个基于绞盘的制动器来产生变异的纯电阻力，就像一个非理想的粒子制动器和一个可离合的弹簧，它能够输出内置弹簧的存储能量，以获得顺从的感觉。绞盘还表现出高度不对称的行为，导致在释放方向上的自动和快速反应。这种绞盘制动器和离合弹簧的双重性创造了一个独特的装置，它超越了二元制动器和/或弹簧的限制，也能抵抗人类规模的力量。

在我们的评估中，我们将CapstanCrunch与一个真正的固定弹簧装置和一个主动的CLAW装置进行比较，以发现性能的局限性，并探索不对称的抓取与释放模拟的理论。我们还测试了所有设备的半空夹持模拟和超顺应性。

贡献

我们在本文中介绍了以下贡献。

- 一个改良的绞盘系统被用作单向线性制动器。
- 一个可变刚度的弹簧机制，使用相同的基于帽式制动器的方法来呈现触觉反馈中的弹性。
- 一个低成本、低延迟、廉价和简单的扭绳驱动器，其低力被我们的机制所放大。
- 对该装置进行广泛的兼容性验证，并与其他主动或被动弹簧装置进行比较。

相关的工作

本文的工作借鉴了触觉控制器、人体尺度力和基于抓握的输入等相关工作。文献中的触觉设备要么是固定的，要么是移动的。

方法。前者通常在用户的环境中与大地静态接地，因此只能提供有限的覆盖范围，而后者是佩戴式或手持式的，因此没有接地。

掌握的感觉

不足为奇的是，以前的研究都集中在模拟物体的真实抓取力上。用户对某一特定物体所做的许多动作将由其顺应性和/或重量决定[2]。

在这方面，就像现有的抓取模型一样[19]解释了对不同物体形状的期望将如何改变手的抓握方式，用户也会在与物体的最初互动后调整他们的期望和抓握。从本质上讲，物体的主要特征将从最初的互动中得出，这些将为其余的操作设定预期，甚至为未来的释放设定预期[9,24]。

这种感知驱动的抓握行为对于刹车型不对称设备来说会产生非常实际的影响，只要它们能够有非二进制的刹车。更确切地说，如果用刹车吸收外力的设备也能为顺应的物体呈现不同的弹簧常数，即使只是在一个方向上--即抓握的部分可以有高保真度，但释放时遵循一个恒定的行为--

它们仍有可能实现高度真实的性能，因为释放将受到先前抓握经验的严重影响。

接地的触觉反馈

由于牢固地安装在环境中，接地的合力设备有可能在极端力的情况下提供触觉反馈，与用户的输入力相匹配，并使其运动停止在原地。接地式力反馈设备的例子包括Novint Falcon[21]、PHANTOM[33]、HIRO[20]或SPIDAR[35]。

这种接地的反馈装置在操作过程中，将力和空间参照与可能达到的范围进行交换，因为它们将用户的互动限制在可触及的范围内。虽然更大规模的执行器可以超过人的尺寸（例如，那些用于装配和制造的执行器），并产生更大的力，但它们的成本和安装需求对于在交互式VR应用中使用是不现实的。另一种方法是使用被动的触觉反馈，这种反馈是静态的，同时重新引导用户的输入以匹配静态物体的承受力（例如，[13]）。

虽然没有接地，但Canetroller是一个触觉反馈控制器，在使用手杖探索虚拟环境中的物体时，可以维持人类规模的力量[50]。Canetroller通过可穿戴的带子与用户的臀部相连，将控制器的磁粉制动器与用户紧密相连，使Canetroller能够用手杖制动用户的运动。

未接地的触觉反馈

未接地的设备能够被四处移动，并将所施加的力输入到用户自己的身体上。在

在可穿戴界面的情况下，手套和外骨骼通常在佩戴者的手腕或手臂上接地，而手持式控制器通常在手掌上接地。

可穿戴式触觉反馈

最基本的可穿戴触觉设备是安装在手指上的致动器，它可以在用户的指尖上呈现触摸和基于针的纹理[12]和剪切[38]效果。这些效果也可以用来渲染抓取物体时的接触，并通过变形指垫来模拟物体的重力[34]，尽管它们不能产生力反馈。

这些触觉设备通常以手套或外骨骼的形式出现，完全或部分地覆盖用户的手。为了产生可靠的手部触觉，这种手套和外骨骼通常是定制的，需要小心翼翼地戴上，并沿着佩戴者的手指外侧安装其机械装置。由于它们的覆盖面，它们可以在交互过程中呈现触摸[26,30,31]和抓握[10,16,26,30,52]的效果，模拟令人信服的触觉感受。

有几种实现方法可以实现这种可穿戴的界面。类似于人体、肌腱[31]、柔性金属条[52]或手指指骨的复制品[26]

沿着手掌外侧的设计为交互和抓取提供了空间，同时也提供了反馈。还有一些采用手内设计，因此在用户的手掌内接地，并将每个手指与一个致动器相匹配[11]，或者采用手套的形式[40,51]，并能在抓取过程中产生可变刚度的感觉。最接近CapstanCrunch所呈现的力反馈的是Wolverine[16]和Gravity[15]，它们是手戴式外骨骼，在抓取互动过程中使用轨道，鳍状皮套沿着轨道滑动。与Cap-

StanCrunch类似，这些皮套可以用小型驱动器锁定，从而有效地制动用户的抓握，并在维持高抓握力的同时停止抓握。然而，与CapstanCrunch不同的是，用户必须释放所施加的力，这些制动器才能解锁，而我们的控制器可以在任何时候逐步调整力反馈的硬度和/或顺应性。

虽然触觉手套和外骨骼产生的触觉可以有很高的保真度，但其使用的开销是不自然的重量和佩戴者手部的体现，需要仔细的安装程序，以及复杂的机械元件和执行器，使其构造复杂且昂贵。

通过手持式控制器的触觉反馈

最近，与CapstanCrunch密切相关的许多触觉原型控制器已经被研究出来，它们比目前大多数商业控制器中的振动触觉效果更具表现力[8,23]。与手套和外骨骼相比，控制器很容易拿起和放下，它们有一个手柄，可以在整个交互过程中避免抓取和握住它们，而且它们可以承载触觉元素以呈现丰富的效果。

超越振动触觉电机的触觉感受，再搜索者已经在控制器上安装了仪器，以呈现运动感。

效果来模拟持有虚拟物体。根据对象的互动，控制器已经移动了内部重量，以物理地转移控制器的重心[44,49]。一个类似的效果是通过以不同的速度摆动多个内部元件来创造不同重量的印象[4]。更有甚者，一系列的控制器已经产生了外力作用于它们的感觉，例如使用外部万向轮[36,47]或空气移动的螺旋桨[27]。

另一类触觉控制器在用户的手指上产生触觉和运动审美效果，同时握住并移动控制器。在与虚拟物体互动时，控制器可以在手指下旋转轮子，以呈现剪切力[32]和不同的材料[48]。其他控制器适应虚拟物体的表面法线，使用户有一种使用倾斜和挤压平台触摸虚拟形状的感觉（NormalTouch[7]）。通过使用文本数组渲染这样一个倾斜和挤压的

"平台"，TextureTouch可以在用户移动控制器探索物体时，在用户的指尖上渲染物体的纹理和表面方向[7]。

最后，几个触觉控制器被设计用来支持VR中的抓取，这是触摸输入后最常见的活动之一[19]。TORC是一个刚性控制器，通过在抓取过程中施加压力时单独振动指垫表面来模拟抓取[28]。CLAW是一个带有可动臂的触觉控制器，可以引导用户的手指产生触摸反馈、抓取力反馈，并通过用户手指下的振动产生物体纹理[17]。CLAW还可以模拟顺应性的虚拟物体和弹簧，并以相当大的力来打开用户的抓握。这是由一个强大的伺服电机来控制控制器的打开，但其代价是重量、功率的使用、一些安全问题以及执行器的尺寸和成本。更大的致动器本身能够产生更强的力感，如Haptic Links[43]，它连接并动态制动锁定两个控制器以支持双手操作的任务，但增加了重量、不可控性，并放弃了所有控制器都渴望的集成外形因素。

通过CapstanCrunch，我们在一个集成的外形尺寸中提供了强大的力反馈感应，获得了在VR中使用控制器的好处，同时支持具有动态顺应性的人类规模的力量，而无需使用沉重和昂贵的执行器。我们的控制器使用一个基于绞盘的摩擦制动机制来实现这一目标，该机制的阻力是通过一个小型电机来控制的()。

capstancrunch的设计和实现

CapstanCrunch采用了可编程制动器的电阻性摩擦力来阻止人类的手指运动。我们选择这种方法是因为它的实施成本低，简单，安全，在人类规模的力量下操作，低延迟，高速度和低电力需求。

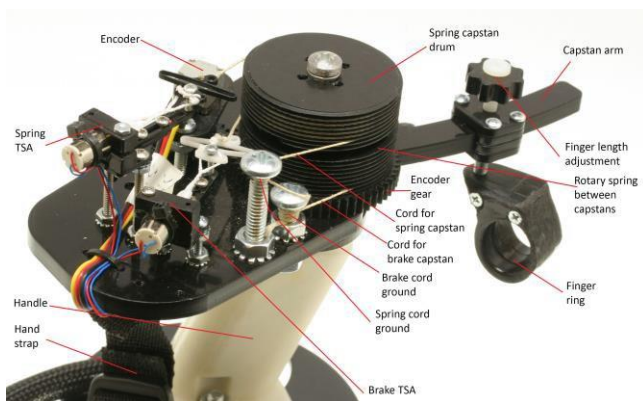


图2：CapstanCrunch触觉控制器。

我们利用了绞盘制动器的能力，它使缠绕着绳索的滚筒的对数力关系得到了满足。图3显示了这种关系，绳索-滚筒的摩擦力取决于固定的总风角、绳索的张力和绳索与绞盘滚筒之间固定的相互摩擦系数。

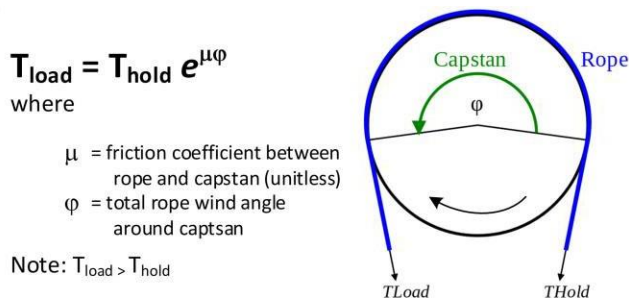


图3：基本绞盘方程和绳索关系。基本绞盘方程和绳索关系。

请注意，像大多数绞盘系统一样，绳索和滚筒之间的摩擦关系要么是静态的（相对于绳索来说绞盘不动），要么是动态的（绞盘旋转）。由于我们无法找到静态和动态摩擦系数的数据，我们根据经验测试了许多绞盘和绳索的摩擦关系对，以发现一个在静态和动态摩擦之间具有最小差异和滞后的关系（小的粘滑系数），这样我们就能以线性方式操作制动器，而不仅仅是在二进制的开/关模式。

在探索过程中，我们发现将乙缩醛（如Delrin）与Vectran（Celanese公司的一种LCD塑料）配对作为鼓的材料，可以使我们以一种近乎线性的方式操作制动器。除了在乙缩醛上很滑之外，Vectran还具有很高的拉伸强度、抗拉伸性和低蠕变性。

CapstanCrunch控制器

最后的CapstanCrunch原型图见图2。照片显示了用Vectran线缠绕的两个级联的绞盘鼓，在鼓的一侧与设备框架接地，另一侧与执行器连接。不可见的是连接两个绞盘鼓的旋转弹簧，以产生可编程的合规触觉。该

在这张照片中，控制器的固定静态拇指托被遮挡住了。

在整个开发过程中，我们所有的控制器原型在使用过程中都安装了6DOF

Vive追踪器，它将我们的控制器定位在6DOF空间，从而可以推断出用户的手指和拇指在VR场景中的位置，用逆运动学来衔接虚拟手[42]。

图4显示了CapstanCrunch的机械部件和连接。注意刹车和/或弹簧装置可以在程序上表现出对手指的阻力。

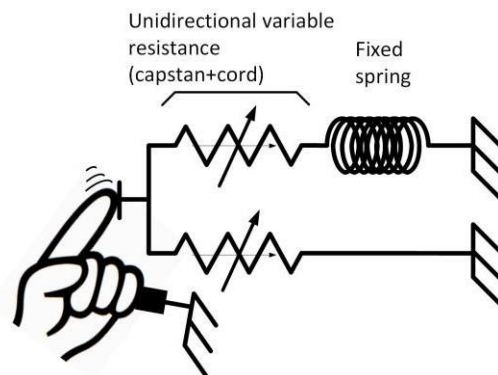


图4 CapstanCrunch机械示意图

线性制动器的接合和释放

与大多数绞盘系统不同的是，我们的控制器中的绞盘鼓是由用户的手指控制的，而绳索是固定的。

图中显示了刹车系统的示意图，并列出了力的方程式。一个小型的内部执行器在绳索上施加一个低张力的力（ T_{hold} ），绳索的高张力（ T_{load} ）一侧被固定（接地）到手持设备上。因此，当用户试图在推杆张力较小或没有 T_{hold}

的情况下逆时针方向旋转绞盘时，绞盘鼓或多或少地自由旋转，没有反对的力量。随着推杆张力的增加， T_{hold} ， T_{load} 成倍增加，使滚筒更难向逆时针方向转动。

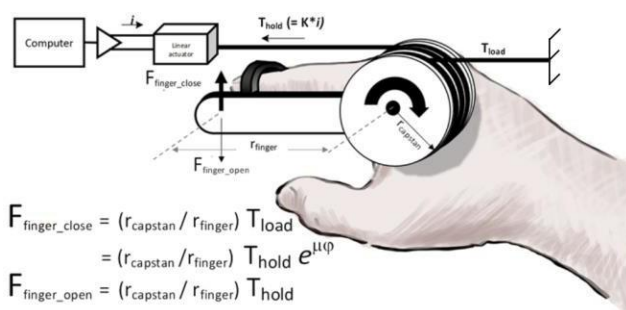


图4：我们的纯制动系统示意图，显示了手指力与绳索张力的关系。

当用户以顺时针方向旋转滚筒时， T_{hold} ，通过将滚筒的出线点靠近内部执行器而自动减少。随着 T_{hold}

我们在CapstanCrunch中实现了一个高度不对称的力的装置，在操作上类似于商业上可用的单向制动器，通过扭转绞盘的方向（手指打开）自动释放。

使用这种方法，用户在手指闭合时体验到一个程序化的力，而在手指打开时体验到一个非常低的力，而这是不需要电阻力的。

然而，在实践中，在强大的闭合力事件后，线与鼓存在粘接力，所以当用户打开他们的手指时，所有的张力确实没有释放。我们认为这可能是由于Vectran线的编织，增加了一个小的初始拉伸，并部分地坐进了柔软的乙缩醛。我们通过监测手指的位置编码器来克服粘接力。当发现用户正在将他们的拇指从他们的拇指上移开时，控制器将一个小的反向脉冲施加到TSA致动器上，从而进一步释放绳索上的低端张力，从而重新使鼓自由旋转。

固件控制回路

控制CapstanCrunch行为的代码将手指位置编码器作为唯一的输入，将旋转电位器编码器的输出转换为与绞盘鼓相适应的电压。将这个编码器作为我们控制器中唯一的反馈元件，可以实现简单和低成本的实施，不需要昂贵的力传感器。基于我们的控制回路以20千赫兹采样的手指位置传感器，CapstanCrunch通过PWM信号驱动各自的致动器来调整其力反馈行为和弹簧啮合，该信号产生可预测和可重复的阻力，遵循绞盘方程式。

Teensy

3.6微控制器在我们的控制器中运行固件，直接转换和处理旋转编码器信号，为执行器产生一个PWM信号。微控制器的PWM终端连接到一个限流的DRV6671电机驱动器H桥，它驱动一个E-flite EFL9052无芯电机。

Teensy微控制器通过串行连接与PC相连，以事件时间表的形式从我们的VR环境中指定顺应性、弹簧和刹车设置。该计划是一个位置和力的列表，在这个列表中，绞盘应该在给定的手指位置上启动。追踪6D中的控制器，并根据其位置和方向，我们指定手指打开的角度，CapstanCrunch应该应用某些压缩力或刹车力，然后在我们的控制回路中以20kHz的频率执行和输出。CapstanCrunch对打开角度的变化作出反应，并以可忽略不计的延迟调整力的激活。

渲染触觉效果

在构建了这个机制后，我们发现许多触觉事件可以根据编程的电阻和顺应力来合成。当手指编码器

在报告与物体的适当接触位置时，制动器被驱动到所需的低张力力，该力立即以机械方式传达给用户的手指，作为一种阻力。为了模拟挤压硬度低于刚性物体的东西，例如粘土，致动器被命令以比前一个例子更小的力致动。用户会感觉到与粘土的接触，但如果有足够的作用力，就能够在VR显示屏上出现适当的视觉效果来挤压和变形粘土。

消除电线重叠

为了纠正之前可能出现的绳索重叠问题，我们在乙缩醛滚筒上加工了一个螺旋线或螺纹状的凹槽。图5显示了改进后的绞盘鼓，它现在可以将新线困在深槽中，这样它就可以保持原位，不会重叠，但仍然可以与乙缩醛表面正确互动。



图5：在乙缩醛桶中加工出的螺旋槽，用于预设通风绳的重叠。

为触觉制动器增加顺应性

为了增加顺应性的触觉感受，我们通过一个旋转或环形弹簧将第二个绞盘连接到制动绞盘上。这第二个绞盘作为一个离合器，在适当的时候接合弹簧。图6显示了我们组件的编码视图。

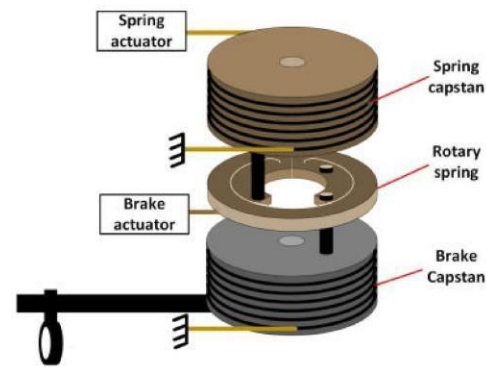


图6：连接弹簧绞盘和刹车绞盘的旋转弹簧的剖视图

这个弹簧绞盘的高张力LOAD线一侧与控制器本体接地，低张力HOLD线与第二个低力执行器相连。在没有驱动弹簧和刹车绞盘的情况下，它们随着手指的关闭而自由旋转。如果只是弹簧绞盘以最大的力被驱动，手指运动和制动绞盘通过旋转弹簧和绞盘连接到地面。在这种情况下，用户体验到的是对一个具有恒定弹簧系数 k 的弹簧的挤压。

$$\text{手指闭合力} = k * \text{手指闭合距离}$$

(从执行位置开始)

请注意，在这种情况下， k 是一个常数。如果我们让弹簧绞盘因较小的驱动力而滑动和/或施加一个小的线性制动力，我们可以调节用户感觉到的感知弹簧常数 k' 。现在感知的顺应性是固定的弹簧常数、弹簧绞盘滑动的程度和施加多少刹车的函数。通过使用这些变量，我们可以合成许多不同的感知弹簧行为。关于如何感知，请看用户测试部分。

扭绳式推杆

最后，为了克服电机+齿轮推杆的低速，我们利用了扭绳推杆（TSA）的技术。这种技术已经存在了几个世纪，在这种应用中功能良好[22]。

我们在图7所示的CapstanCrunch中建立的TSA由一个小型传呼机马达组成，它连接着一个轮毂，在旋转固定但滑动的臂上卷起一对绳索（Spectra钓鱼线，100磅测试）。当绳索被马达缠绕时，它拉动与小连接弹簧相连的滑动臂，并将绳索的张力作为提供给马达的电流的函数施加到绞盘的HOLD侧。

小的连接弹簧作为顺应性添加到推杆上，以弥补张力增加和绞盘转动时的小的明显的绳索拉伸，改变少量的保持和加载张力。这种明显的绳索拉伸似乎与制造商的绳索拉伸规格不一致，但经与制造商核实，主要是由于绳索的编织几何形状的初始收缩以及绳索在滚筒上的弯曲造成的。

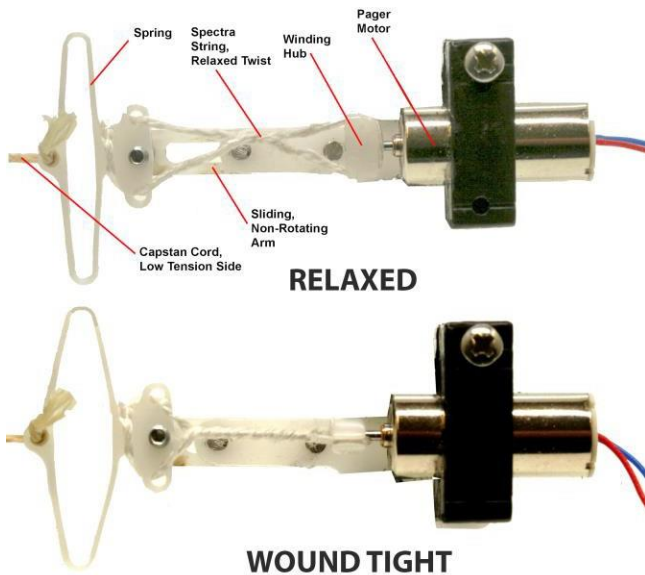


图7：用于提供绞盘低张力LOAD输入的扭绳执行器（TSA）。

TSA还以其将电能转换为机械能的效率和反驱动能力而闻名，这比正齿轮更好。此外，由于其能量转换效率高、惯性负载低和无芯电机设计，其响应和延迟比以前的执行器或大多数业余伺服电机快得多。TSA也没有产生齿轮传动器所特有的噪音。

早期的样机

我们在寻找CapstanCrunch的过程中创造了许多早期原型。在这一节中，我们简要介绍一下我们在创建CapstanCrunch时发现的一些挑战。图8显示了我们为探索绞盘式制动器而建立的早期原型的注释图像。当用户在手掌中握住手柄时，食指很容易滑入指环。当用户打开和关闭他们的手指时，指杆、编码器齿轮和绞盘鼓就会一体旋转。绕着圆柱形的绞盘鼓，绳索的LOAD端（接地）与框架相连，HOLD端与内部执行器相连接。

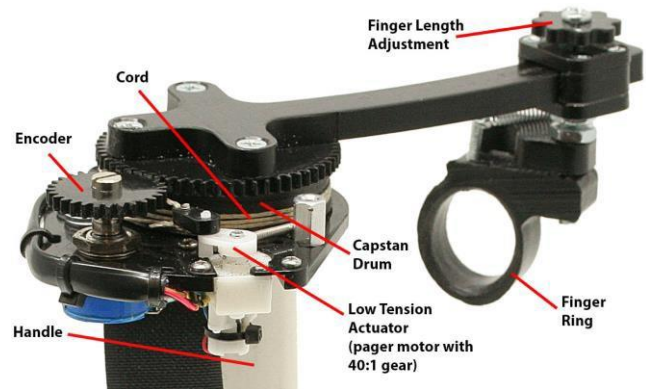


图8：早期基于绞盘的摩擦制动器设计

我们早期的控制器原型中的致动器是一个市面上可以买到的带有正齿轮的传呼机马达组件，产生40:1的齿轮比，输出为一个旋转的杠杆。这为绞盘系统的低张力HOLD输入提供了足够的张力，同时在绳索从松到紧的约140毫秒内运行。

然而，这种特殊的实现方式也有问题。由于没有主动强迫装置推动用户的手指或内部机械能量储存的来源，所以没有可接受的方法来模拟弹簧或其他我们认为重要的顺应性触觉。此外，还有一种可能，就是绳索“过度缠绕”，即绳索被缠绕在鼓上，有一层或多层与其他层重叠。这破坏了摩擦的可预测性，并可能导致制动器的永久锁定。另一个问题是，内部推杆的启动时间很慢。在大约140毫秒的时间内，如果用户的手指移动得太快，就很难在正确的时间内启动该装置。在测试过程中，采用外推法作为预测在正确时间刹车的固件解决方案并没有带来很大的改善。

机械性能测试

进行了多项性能测试，以创建最终的机械原型。其性能如下。

- 最大力时达到的刚度：5.88 N/mm
- TSA驱动信号到输出力的延时：6.5ms
- 力的动态范围 < 0.2N -> 20N (或 ~ 100:1)

力的测量是使用**错误**中的设置获得的。**没有找到参考源**。一个计算机控制的齿轮步进电机将指托向拇指方向移动，同时改进的力传感器以10KHz的采样率记录所施加的力和手指的位置。

执行延时

我们使用带有1000fps功能的富士HS-10录像机来记录和分析在最大启动速度下的收卷和放卷反应。这一测量报告显示，致动为5毫秒，释放为5.2毫秒。至于寿命，我们对致动器进行编程，使其每秒循环一次，持续24小时（86,400次），绳子或电机的行为没有明显的恶化。然而，在连续循环3天后，电机在上弦时更难转动。这可能是由于电机中的轴承磨损造成的，这些轴承不是为轴向负载设计的，只是为径向负载设计的。我们认为可以在电机或系统中设计一个推力轴承，以延长磨损。图9显示了我们设计的一个自动配对系统，以测试我们的绞盘和组合系统。

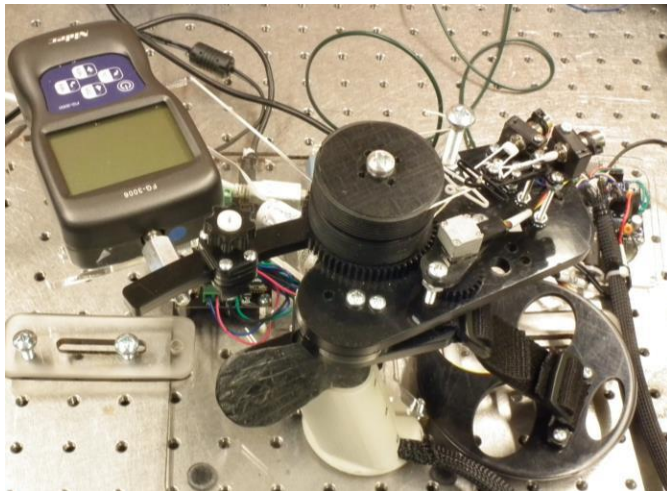


图9：机器人力与手指-

拇指距离的测量设置。一个计算机控制的齿轮步进电机将指托向拇指移动，同时改进的力传感器以10KHz的采样率记录所施加的力。

用户研究

一项用户研究被设计来评估使用CapstanCrunch抓取的性能。参与者看到了6个具有不同压缩性的虚拟物体（从刚性到“稀薄的空气”，其中没有预期的阻力）。每个物体都有5种不同的尺寸。利用这一系列的物体，我们探索了CapstanCrunch的性能如何。

与一个固定的弹簧系统装置（图10右）和一个可以主动提供对称抓取和释放模拟的致动控制器（CLAW，图10左）相比，CapstanCrunch的表现更好。按照设计，CapstanCrunch有一个不对称的渲染，其中抓取弹簧常数可以被调制，但释放将保持固定。

我们根据物体的大小和顺应性进行视觉渲染，同时使用3种不同的方法（物理弹簧、电动CLAW和CC）进行同步的触觉渲染。参与者将触觉模拟与他们对视觉行为的期望值进行比较，如果视觉和触觉模拟符合他们的期望值，他们就会对其真实性打高分。

鉴于CapstanCrunch的绞盘+TSA性质，与弹簧装置的比较是为了提供一个真正顺应性抓取的基准体验，而CLAW提供了一个完全刚性抓取的基准，可以在没有摩擦的情况下按需制动。

参与者

我们通过内部电子邮件从本机构招募参与者。总共有12名参与者（2名女性，年龄在27至51岁之间）完成了用户研究。所有参与者都是右撇子。根据赫尔辛基宣言，所有参与者都给出了书面知情同意书，并为他们的参与支付了15美元。这项用户研究得到了一个机构审查委员会的批准。



图10：左）爪子装置。右）固定弹簧装置。弹簧装置是作为其他两种原生类型CapstanCrunch和CLAW的仿制品制造的，不同的是指臂只与一个固定的弹簧相连。

仪器和实验设置

参与者配备了HTC

Vive

VR头盔，以及三种设备中的一种。CapstanCrunch、Spring或CLAW。CapstanCrunch的设计如前文所述，CLAW未经修改[17]，而我们将Spring设备作为其他两个原型的近似复制品，唯一的区别是指臂与一个固定的弹簧相连（图10）。所有的设备都与跟踪系统相连，在HMD中被试者的手的位置呈现出一只虚拟的手（图11）。

参与者在盲目的情况下体验这三种设备，也就是说，他们是在已经佩戴了HMD之后才得到这些设备的，之前并没有使用这些设备的经验。该研究采用了主体内设计，其中

所有参与者按照拉丁方格随机排列的顺序使用所有设备。

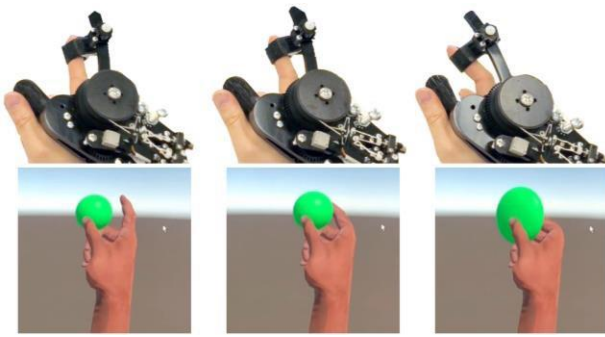


图11：用户研究期间用CapstanCrunch抓取和释放顺应性球的例子。

任务总是相同的：参与者手中有一个虚拟的球，有5秒钟的时间多次捏住它，从而体验模拟的符合特定设备的情况。主要实验包括一连串不同硬度和大小的随机球（图11）。

参与者总共完成了 $6 \times 5 + 1 = 31$ 个条件（即6个球，5个尺寸+1个半空）。在每个球之后，参与者对他们觉得触摸+视觉体验的逼真程度从1到7进行评分。在每个装置结束时，他们被问及他们在使用该特定装置时，最喜欢和最不喜欢的方面是什么。该实验持续了不到30分钟。

刚度范围

总共有7个动态范围的刚度水平，从稀薄的空气夹层到完全刚性的球。中间点刚度是指CapstanCrunch、Spring和CLAW的弹簧 K 常数被平衡为0.5

N/m。对于Spring和CapstanCrunch的特殊情况，这与它们的地面真理 k 相匹配。由于CLAW是通过电机驱动的，没有实际的地面真理 k 。因此，我们将地面真理定义为虚拟物体，其顺应性等于物理弹簧设备和CC使用的弹簧常数。对于这个物体，所有的设备都应该呈现出“完美

”的触觉反馈，并且应该在用户中排名靠前。当渲染不同顺应性的物体时，CC、CLAW和弹簧的渲染将偏离预期的物理反应的保真度。

为了模拟更小的 k ，我们开发了一种重定向技术，参与者的动作被放大，使球看起来比实际装置更挤[6]。我们的想法是创造超顺应性的错觉，即使弹簧不能提供这么小的 k ，这是一种顺应性的触觉重定位[1,6,25]。通过有效地放大运动，我们创造了一个更大的距离（ d ）的错觉，心理上的胡克定律方程 $F=k \cdot d$ 被扭曲了，创造了一个较小的 k 的错觉。对于弹簧装置的情况，我们

我们还对2个 K 值较大的球做了重新定位，对于这2个球，我们做了相反的工作，缩小了用户的动作以模拟更大的 K 值。

尺寸范围

此外，不同硬度的球以五种不同的球尺寸（4厘米、5厘米、5.5厘米、6厘米、7厘米）呈现。尺寸变化的介绍有两层含义。(i)避免6个不同的球容易被识别，(ii)考虑到本体感觉的漂移对我们的强制性重定向技术的重要性，但在使用弹簧设备时也是如此。在弹簧装置的情况下，指臂开始接触弹簧的位置是固定的，因此虚拟手指将被重新校准，以便在那个精确的瞬间始终与球接触（与1比1大小相关的球是5.5厘米的球）。而其他设备则不需要这种技巧，因为它们可以在指臂与球接触的特定角度上啮合。地面真实球的尺寸被计算为与Spring装置的弹簧啮合点1比1匹配。

结果

通过我们的用户研究，我们将CapstanCrunch的性能与固定弹簧抓取装置和CLAW原型进行了比较。结果显示，在所有的比较中，CapstanCrunch在减去地面实况的情况下都明显胜过固定弹簧装置的结果。

我们对有3个因素的线性混合效应模型进行了重复测量方差分析。硬度、尺寸和条件。条件 ($F(1, 1084) = 57.6, P < 0.001$) 和条件 \times 硬度 ($F(2, 1084) = 134.76, P < 0.001$) 的交互作用有显著影响。对球的大小没有影响，也没有相互作用。

对不同条件下的表现分数做一个完整的汇总（图12），我们发现不同设备的分数有显著差异（弗里德曼配对检验： $\chi^2(2) = 12.8, p = 0.001$ ）。在Bonferroni校正下，应用事后Conover测试进行进一步的配对比较。该分析表明，CapstanCrunch（得分 $M = 5.35, SD = 0.8$ ）提供的真实触觉体验明显高于CLAW（ $M = 4.79, SD = 1.15, P = 0.03$ ）和Spring设备（ $M = 4.24, SD = 1.21, P < 0.001$ ）。CLAW也明显优于Spring设备（ $P < 0.001$ ）。

当更详细地观察时，在符合地面实况的情况下，Spring设备和CapstanCrunch是相当的，因为两者都对用户的抓握进行了1对1的精确触觉和视觉效果。对于所有其他的比较（从半空捏到刚性物体），我们发现CapstanCrunch击败了Spring设备，特别是对于更多的刚性物体，弹簧的表现特别差。

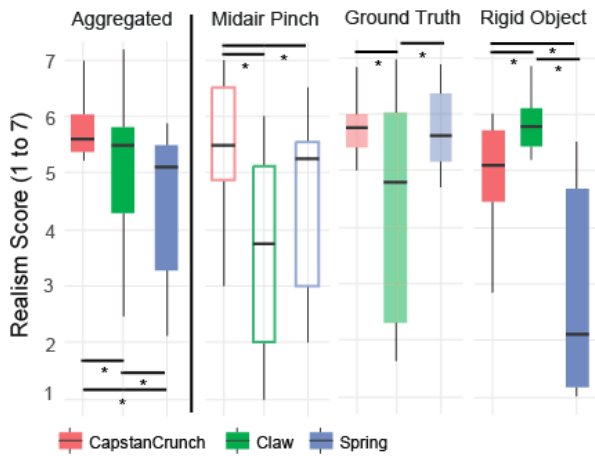


图12：设备的偏好。Tukey

Boxplots显示了参与者对设备的真实性（所有硬度和尺寸的平均得分）和半空中的夹持所感知的得分。弗里德曼配对比较的显著差异用星号标记。中位数是粗的水平线，方框内是四分位数范围（IQR）。胡须从下四分位数-1.5*IQR延伸到最小下四分位数+1.5*IQR。

与CLAW相比，CapstanCrunch并没有击败CLAW所完成的真实刚度水平。然而，CapstanCrunch击败了CLAW的地面实况，在地面实况中，物体的虚拟视觉效果呈现出TSA弹簧的 k ，而且一般来说，对于半空中的挤压（零阻力）和超顺应性物体，CapstanCrunch也是一个更可取的选择。

僵硬的感觉

我们想进一步了解不同设备的触觉真实性（即视觉效果与模拟效果的匹配程度）的综合得分（图13）。为此，我们探索了不同硬度（从超柔韧球到刚性）的性能。我们发现，对于CLAW来说，刚度和得分之间存在着明显的正相关关系（皮尔逊相关关系 $r=0.5$ ， $t(82)=5.36$ ， $p<0.001$ ）。相反，弹簧装置的硬度和得分之间有显著的负相关（ $r=-0.38$ ， $t(82)=-3.7$ ， $p<0.001$ ）（图13，表1）。

每个设备的现实主义得分（平均值±标准差）			
硬度	卡普斯坦 紧缩	爪子	春天
k/100	4.5 ± 1.5	3.6 ± 1.8	4.4 ± 1.6
k/10	5.5 ± 0.8	4.5 ± 1.8	5.7 ± 1.2
k	5.7 ± 0.5	4.5 ± 1.8	5.6 ± 1.1
k*20	5.5 ± 1.1	5.6 ± 0.9	3.8 ± 1.4
k*200	5.3 ± 0.8	5.8 ± 0.9	3.0 ± 1.6
刚性	4.9 ± 0.9	5.7 ± 0.7	2.8 ± 1.9

表1.不同硬度水平和设备的真实性得分（平均值和标准偏差）。

这些结果表明，随着物体硬度的增加，CLAW的渲染趋向于变得更加真实。

增加，而CLAW的低硬度水平被认为更糟糕。相反，当物体变得更硬时，Spring设备的情况尤其糟糕，参与者认为它对有弹力的物体更加逼真。

这些结果表明，随着物体硬度的增加，CLAW的渲染趋于更加逼真，而CLAW k 中的低硬度水平被认为更糟糕。相反，Spring设备随着物体硬度的增加而变得特别糟糕，参与者认为它对有弹力的物体更加逼真。

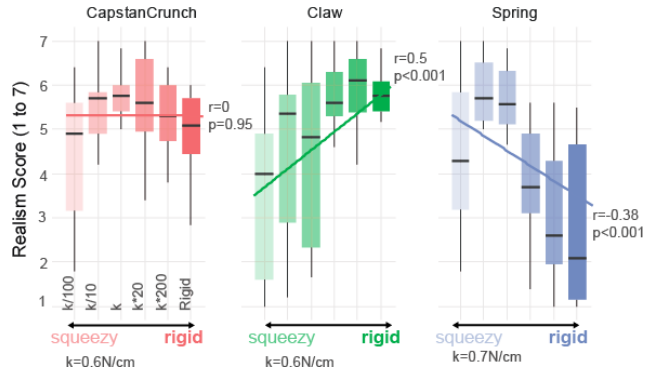


图13：在我们的评估中，三种不同设备的刚度水平的现实性得分

使用同样的相关分析，我们发现CapstanCrunch没有受到这样的影响，而且僵硬度的值（ $p=0.95$ ， $r=-0.006$ ），这意味着它在不同的compliances中的现实主义得分有更高的动态范围。

为了进一步研究哪种设备在每个刚度水平上表现最好，我们进一步分析了刚性物体的渲染、地面真实物体（设备的 k 和视觉的 k 相匹配）以及在半空中使用控制器的科目内效应。

半空中

我们要求参与者评价在半空中捏住时的感觉（图12）。结果显示，参与者对CapstanCrunch（ $M=5.46$ ， $SD=1.25$ ）的评分明显好于CLAW（ $M=3.54$ ， $SD=1.72$ ）或Corris的评分。

弹簧装置（ $M=4.58$ ， $SD=1.64$ ）（Friedman配对检验： χ^2

$(2)=8.2$ ， $P=0.016$ ）。在Bonferroni校正下，应用事后Conover测试进行进一步的成对比较，该分析显示CapstanCrunch在半空夹持方面明显优于弹簧装置和CLAW（ $P<0.001$ ）。而CLAW和Spring设备没有明显的差异（ $P=0.33$ ）。这可能是由于CapstanCrunch在未启动时提供了零阻力，而其他设备则不然。CLAW总是需要电机啮合，而固定弹簧装置总是提供一些顺应性。

刚性物体

我们要求参与者评价当物体完全僵硬时的感觉（图12）。结果显示，CLAW（ $M=5.7$ ， $SD=0.7$ ）和

CapstanCrunch ($M=4.9$, $SD=0.9$) 对刚性物体的得分相当高, 尽管CLAW能够传达更多的真实感 ($p<0.001$)。正如预期的那样, Spring设备 ($M=2.8$, $SD=1.9$) 的表现明显比其他两个设备差 ($p<0.001$)。

符合要求的地面真实对象

我们要求参与者评估当虚拟物体、手和设备1比1匹配时的感知, 即设备中弹簧的 K 常数与虚拟模拟相匹配。结果(图12)显示, 参与者对CapstanCrunch ($M=5.7$, $SD=0.5$) 和Spring装置 ($M=5.5$, $SD=1.0$) 的评分明显高于CLAW ($M=4.5$, $SD=1.8$) ($P<0.036$)。而

弹簧装置和CapstanCrunch没有显著的不同 ($P=1.0$)。

CLAW和其他设备之间的差异可能是由于CLAW没有地面实况, 我们总是对这个设备进行弹簧模拟, 在这种情况下, 它模拟的 K 常数与Spring设备和CapstanCrunch相似。

虚拟现实中的互动场景

使用CapstanCrunch, 我们可以为超出用户研究中探索的顺应性球的不同复杂度的物体提供触觉, 在这些物体中, 弹簧和刚性的相互作用不是线性的, 或者被结合起来创造一个更复杂的物体。

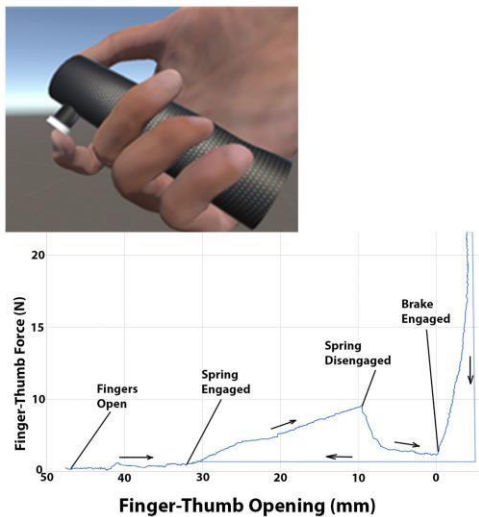


图14: CapstanCrunch在激活和释放一个模拟按钮时施加的力和事件。

非线性触觉抓握的例子包括非线性激活和释放按钮(图14: CapstanCrunch在激活和释放模拟按钮时施加的力和事件。), 组装玩具积木(图15), 或使用一把剪刀(图16: 当用户操作剪刀进行切割时CapstanCrunch施加的力和事件。)逐渐增加的长度是

通过离散的步骤进行近似。在这个例子中, 我们选择了3个步骤, 这给人一种难度增加的感觉)。

在模拟按钮的情况下(图14: CapstanCrunch在激活和释放模拟按钮时施加的力和事件。), 用户开始向按钮表面做无力运动, 这是一个弹簧+刹车的组合。在手指向拇指方向闭合的过程中, 用户感觉不到对手指的压力。当用户的手指接触到按钮时, 弹簧绞盘会施加一个额外的压力。随着用户的进一步推动, 弹簧单独发挥作用, 直到手指到达一个点, 弹簧被释放, 用户在短时间内感觉不到力。再往前走, 用户就会遇到一个完整的刹车阻力, 无法进一步推动。还有一个去掉细微的释放路径, 这表明一个典型的带有大滞后的按钮。

我们用CapstanCrunch实现的另一个复杂的交互作用的例子是玩具结构块的组装(图15)。当两块积木扣在一起时, 会有一个滞后的力循环。具体来说, 组装有三个阶段。首先, 两块积木部分分开, 通过在半空中以无力/低力推动指环将其合在一起。第二阶段, 当两块接触时, 用户会感觉到最初的触摸, 当施加足够的力时, 积木完全啮合。一旦积木组装完毕, 制动器就会停止任何进一步的手指闭合, 手指就可以撤退了。

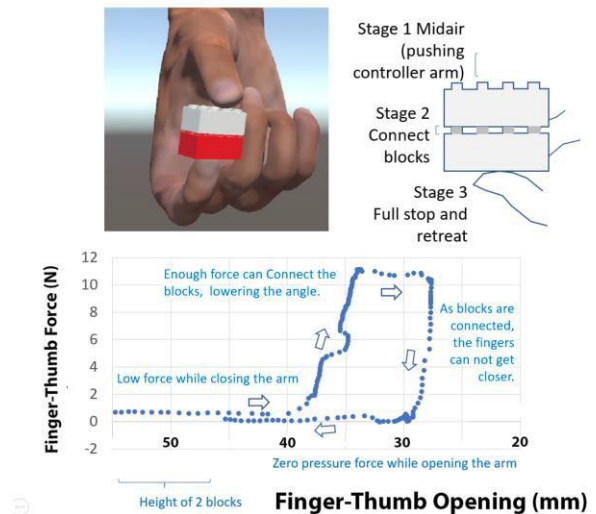


图15: CapstanCrunch在组装两个积木时施加的力和事件。

在最后一个复杂交互的例子中, 我们用CapstanCrunch来实现, 用户可以用一把剪刀来切割材料(图16: 当用户操作剪刀进行切割时, CapstanCrunch施加的力和事件。长度的逐渐增加是通过离散的步骤来接近的。在这个例子中, 我们选择了3个步骤, 这让人感觉到剪切的难度在增加)。力量的逐渐增长

由于材料的杠杆长度的增加而导致的不连续的步骤。

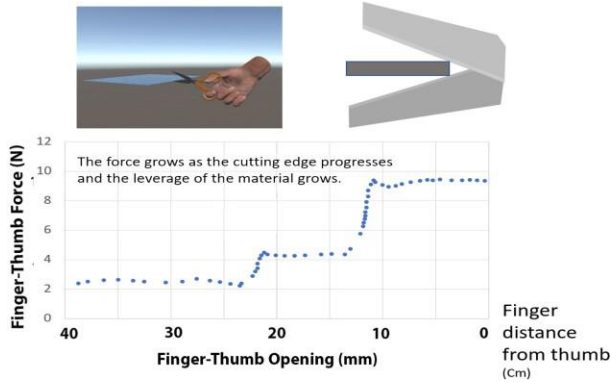


图16：当用户操作剪刀进行切割时，CapstanCrunch施加的力和事件。长度的逐渐增加是通过离散步骤来接近的。在这个例子中，我们选择了3个步骤，让人感觉到剪切的难度在增加。

我们选择了3个步骤，这让人感觉随着剪刀的关闭，切割的难度也会增加。其他可以用CapstanCrunch实现的复杂物体相互作用包括抓取一个玻璃，只要有足够的力就会裂成碎片。所有的力都是用日本电产FG-3000测力计测量的，该测力计被修改为以 >1000 赫兹的速度记录。对于“手指与拇指的距离”这一轴，我们同时记录了手指位置编码器。

讨论

性能测试

当与CLAW以外的其他基于刹车或绞盘的原型相比，我们发现在设计和性能方面都有一些显著的相关方面。

CapstanCrunch在某些方面与Conti & Kahtib相似，后者使用一个改良的SEA来模拟一个安全的双线触觉渲染[18]。他们的设计集中在一个接地的设备上，其中刚度和弹性都被考虑到了，并且在一个多维的系统中具有力的重定向能力。而CapstanCrunch被设计成手持式的，这就减少了对维度的需求。这样一来，CapstanCrunch可以在较小的外形尺寸中实现高性能，例如，作为手持式，我们可以只在一个方向上关注一维限制性力。从本质上讲，这两个系统都使用了类似的方法，但CapstanCrunch与他们的H2O推杆不同，因为使用了一个制动器（最大刚度为5880 N/m）而不是他们的电机。CapstanCrunch的解决方案也比SEA的解决方案增加了我们的刚度动态范围，并提高了能源效率，但在呈现顺应物体的刚度方面有所妥协。

Agarwal等人[3]在他们的原型中也使用了SEA，但它主要是作为一种方法来测量基于电机的闭环系统中的应用输出力。CapstanCrunch则采用了一个更节能的电阻式制动器。

系统加上一个固定的弹簧和一个制动器作为用户的力源。在这方面，带有力反馈的主动系统可以模拟可变刚度和弹性，具有更大的灵活性，但效率较低。

在他们的肌腱驱动装置中，Kang等人在电机和负载之间使用了一个绞盘制动器，以便在电机关闭时保持电缆的张力[29]。因为CapstanCrunch没有被设想成一个肌腱，所以它不需要在两个方向上的输出力。用户只在非驱动（手指打开）方向上提供一个低的（ <0.2 N）力。

在另一种肌腱方法中，Vigaru等人采用了伺服电机和肌腱来远程驱动触觉设备[46]。然而，在该设计中，电机是主要的力源，而CapstanCrunch使用的是一个制动器。

在另一个基于电机-

制动器的系统中，An等人使用了一个闭环操作的电机和一个制动器的组合，研究了一个能够模拟可变刚度和弹性以及保持稳定的混合触觉执行器[5]。与CapstanCrunch的主要区别是，它采用了固有的稳定的比例制动器，并能以编程方式管理刚性和/或（固定）顺应性输出阻力的组合。其他的马达和刹车设计，如Rossa等人[39]使用一个马达和两个双向刹车来产生模拟可变触觉弹性的输出力。虽然我们认为这种方法更接近任何所需的弹性，但对于一个紧凑的手持式控制器来说，我们的方法是一种妥协，可以在用户测试中达到很高的性能。

用户测试

我们已经证明了CapstanCrunch有能力提供高动态范围的顺应性（从半空中的无力夹持到顺应性物体到刚性物体）。此外，我们还展示了各种复杂的交互场景（使用剪刀、组装玩具积木或按下按钮），这些场景在抓取事件中结合了多种刚度和顺应性，其中固有的力和刚度可以动态变化。

用户研究显示了一个令人惊讶的新效果：当涉及到对物体顺应性的感知时，用户对抓取的重视程度要高于释放。我们预计完全马达化的CLAW会被选为最佳体验，因为CapstanCrunch只在手的压缩方向上改变触觉呈现，而在另一个方向上使用固定的弹簧。因此，我们的设备是不对称的，然而，与CLAW相比，它显示了参与者的高满意度。这可以解释为，用户对压缩物体和放松握力（通常用于释放物体）的关注度更高。这种令人惊讶的行为可能会影响到未来触觉控制装置的设计。

通过我们的用户研究，我们将CapstanCrunch的性能与固定弹簧抓取装置和CLAW原型进行了比较。正如预期的那样，CapstanCrunch明显

在除地面实况以外的所有比较中都胜过固定弹簧装置的结果。在符合地面实况的情况下，弹簧装置和CapstanCrunch是相当的，因为两者都对用户的抓握呈现出1比1的准确触觉和视觉效果。对于所有其余的比较（从半空中捏到一个刚性物体），我们发现CapstanCrunch击败了弹簧装置，特别是对于更多的刚性物体，弹簧的表现特别差。

然而，CapstanCrunch并没有击败CLAW所完成的真实的刚性水平。尽管CapstanCrunch的分数不高，但在刚性设备上的结果还是相当令人满意的。我们假设CapstanCrunch未来的变化可能包括更快的驱动，以改善对刚性物体的渲染。有了更快的致动器，抓取刚性物体的感觉会更硬，因为力的开始和释放会在更短的时间内发生。

另一方面，CapstanCrunch在呈现空中抓取时比CLAW好得多。CLAW的主要问题是其电机和力传感器的特殊选择所产生的背景阻力。与CapstanCrunch在刹车不啮合时能达到的零阻力相比，CLAW在最低阻力下运行，这是很重要的。这当然是设计上的限制，更好的设计可以使CLAW在更低的空转电阻下动作。相比之下，我们的Capstan设计可以用更便宜的致动器表现得更好。我们的机制能够将内部致动器的力放大大约40倍。与有源力控制装置相比，我们的方法成本低、稳定、电力不足、坚固、安全、快速和安静，同时为用户互动提供了高力控制。

CLAW的内嵌阻力问题在非常小的 k （弹簧常数）的模拟中也持续存在。因此，CLAW只有在超过一定 k 的情况下才有较高的精度。CLAW在渲染非常柔软的物体方面的局限性，加上Spring设备在渲染非常坚硬的物体方面的局限性，使得CapstanCrunch在分数汇总后成为最受欢迎的设备。

这些结果表明，我们对制动帽+离合器的独特设计成功地创造了用于抓取物体的可变 K 。有趣的是，尽管CapstanCrunch的 K 值只在一个方向上调节--朝向物体的抓取，而释放时的 K 值总是固定的，与被抓取的物体无关，但这还是完成了。刹车驱动系统的这一限制似乎并没有困扰到用户。根据这些结果，我们假设抓取确实是一个非对称的任务，而且更类似于其他非对称抓取动物的抓取，如龙虾的爪子或鳄鱼的嘴，它们在抓取的方向上比释放的方向上强得多。

CLAW是一个对称的设备，在大多数效果图中没有显示出与我们的原型的明显差异，这一事实进一步验证了这一假设。

结论和未来工作

我们提出了CapstanCrunch，一个用于呈现抓取反馈的触觉控制器，其力量可达人类规模。CapstanCrunch是围绕着一个新颖的基于摩擦的绞盘加绳索的制动器而建立的，它放大了我们控制器中的小型内部执行器的力量，以维持用户的输入。内部致动器本身很小，这使得我们的综合控制器坚固有力，但又很便宜、低功耗，而且重量很轻，这与以前许多已知或假设的控制器不同。CapstanCrunch采用了相同的绞盘原理来驱动弹簧，它可以有选择地对抓取进行触觉顺应。CapstanCrunch有能力通过一个由小型内部执行器动态控制的机制，提供一套全面的顺应性触觉。

在我们的评估中，我们将CapstanCrunch与之前的主动抓取反馈控制器以及被动弹簧控制器进行了比较，结果显示参与者对CapstanCrunch所呈现的顺应性触觉反馈的评价要高于其他两个设备。

我们还评估了CapstanCrunch的非对称弹簧顺应性 K ，它只对抓取方向施力而不对释放方向施力，在用户研究中被参与者验证为一种合理的方法。结果显示，刹车控制器设备的前景很好，它能使非对称顺应性与更基本的抓握不对称性的存在相一致，但还需要在未来进一步验证。

未来的工作还将集中在减少部件的尺寸上。我们希望缩小绞盘和致动器的体积，并将其放在手掌握把内（例如，类似于[22]）。这一发展也将有助于将类似的触觉机制纳入一个以上的手指。

最后，为了增加对手持物体的正常皮肤触摸，我们计划在指尖支撑处安装一个音圈致动器。我们还将拇指托上增加一个触控板（例如，类似于[28]），以便在物体在手时增加更精细的操作能力[2]。

参考文献

1. Parastoo Abtahi and Sean Follmer. 2018. 用于提高形状显示器感知性能的视觉-触觉幻觉。2018年CHI计算系统中人的因素会议论文集, ACM. 150:1--150:13. <http://doi.org/10.1145/3173574.3173724>
2. Michael J Adams, Simon A Johnson, Philippe Lefèvre, et al. 2013. 指垫摩擦及其在抓握和触摸中的作用。《皇家学会界面杂志》10, 80.
3. Priyanshu Agarwal and Ashish D Deshpande. 2017. 用于小规模机器人的串联弹性执行器

应用。《机械和机器人学杂志》9, 3, 31016.

4. Tomohiro Amemiya和Taro Maeda.2008.不对称振荡扭曲了对手持物体重量的感知。 *IEEE Transactions on Haptics* 1, 1, 9-18.
5. Jinung An和Dong-Soo Kwon.2006.带有主动/被动执行器的触觉界面的稳定性和性能-理论和实验。 *The International Journal of Robotics Research* 25, 11, 1121-1136.
6. Mahdi Azmandian, Mark Hancock, Hrvoje Benko, Eyal Ofek, and Andrew D Wilson.2016.触觉重定位。被动触觉的动态再利用以增强虚拟现实体验。 *2016年CHI计算系统中人的因素会议论文集*, ACM, 1968-1979.
7. Hrvoje Benko, Christian Holz, Mike Sinclair, and Eyal Ofek.2016.NormalTouch和TextureTouch: 手持式虚拟现实控制器上的高保真3D触觉形状渲染。 *第29届用户界面软件和技术年度研讨会论文集*, 717-728. <http://doi.org/10.1145/2984511.2984526>
8. Christopher C Berger和Mar Gonzalez-Franco. 2018.将触觉扩展到身体之外。 *第15届ACM应用感知研讨会论文集*. ACM, 10:1--10:9. <http://doi.org/10.1145/3225153.3225172>
9. Christopher C Berger, Mar Gonzalez-Franco, Eyal Ofek, and Ken Hinckley.2018.触觉的不可思议之谷。 *科学机器人学* 3, 17. <http://doi.org/10.1126/scirobotics.aar7010>
10. Jonathan Blake和Hakan B Gurocak. 2009.用于虚拟现实的带有MR刹车的触觉手套。 *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics* 14, 5, 606-615.
11. Mourad Bouzit, George Popescu, Grigore Burdea, and Rares Boian.2002.Rutgers Master II-ND力反馈手套。 *第10届虚拟环境和远程操作系统触觉界面研讨会论文集*, IEEE计算机协会, 145--.
12. Stephen Brewster和Lorna M Brown. 2004.Tactons: 用于非视觉信息显示的结构化触觉信息。 *第五届澳大拉西亚用户界面会议论文集-第28卷*, 澳大利亚计算机协会, 15-23.
13. Lung-Pan Cheng, Eyal Ofek, Christian Holz, Hrvoje Benko, and Andrew D Wilson.2017.稀疏的触觉代理。在虚拟环境中使用一般被动道具的触摸反馈。 *2017年CHI计算机系统中人的因素会议论文集*, ACM, 3718-3728.
14. Francesco Chinello, Claudio Pacchierotti, Monica Malvezzi, and Domenico Prattichizzo.2018.一个三层旋转的球状可穿戴指尖用于刚度渲染的皮肤设备。 *IEEE Transactions on Haptics* 11, 1, 39-50. <http://doi.org/10.1109/TOH.2017.2755015>
15. Inrak Choi, Heather Culbertson, Mark R. Miller, Alex Olwal, and Sean Follmer.2017.Gravity. 一个用于模拟虚拟现实中的重量和抓取的可穿戴触觉界面。 *第30届ACM用户界面软件和技术年度研讨会论文集*, 119-130. <http://doi.org/10.1145/3126594.3126599>
16. Inrak Choi, Elliot W Hawkes, David L Christensen, Christopher J Ploch, and Sean Follmer.2016.Wolverine: 一个用于在虚拟现实中的抓取的可穿戴触觉界面。 *智能机器人和系统 (IROS), 2016 IEEE/RSJ国际会议*, 986-993.
17. Inrak Choi, Eyal Ofek, Hrvoje Benko, Mike Sinclair, and Christian Holz.2018.CLAW: 一个用于在虚拟现实中的抓取、触摸和触发的多功能手持触觉控制器。 *2018年CHI计算系统中人的因素会议论文集*. 654:1-654:13. <http://doi.org/10.1145/3173574.3174228>
18. François Conti和Oussama Khatib.2009.一种用于触觉界面设计的新驱动方法。 *国际机器人研究杂志》* 28, 6, 834-848.
19. Mark R Cutkosky.1989.关于抓取选择、抓取模型和制造任务的手的设计。 *IEEE Transactions on robotics and automation* 5, 3, 269-279.
20. Takahiro Endo, Haruhisa Kawasaki, Tetsuya Mouri, 等. 2011.五指触觉界面机器人。 *HIRO III.IEEE Transactions on Haptics* 4, 1, 14-27.
21. N Falcon.2014."Novint falcon"触觉装置。 *Novint技术公司*.
22. Igor Gaponov, Dmitry Popov, and Jee-Hwan Ryu.2014.扭转字符串执行系统。数学模型的研究和扭绳的比较。 *IEEE/ASME机械电子学的交易* 19, 4, 1331-1342.
23. Mar Gonzalez-Franco 和 Christopher C Berger.2019.头像的体现增强了对体外触摸幻觉的触觉信心。 *IEEE transactions on haptics*.
24. Mar Gonzalez-Franco, Christopher C Berger, and Ken Hinckley.2018.如果(虚拟)现实感觉几乎是正确的, 那就是完全错误的。 *科学美国人》*。
25. Mar Gonzalez-Franco和Jaron Lanier. 2017.幻觉的模型和虚拟 Reality. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01125>
26. 顾晓琪, 张逸飞, 孙伟泽, 边远哲, 周道, 和Per Ola Kristensson. 2016.Dexmo:用于VR运动捕捉和力反馈的廉价和轻量级机械外骨骼。

- 2016年CHI计算系统中人的因素会议论文集, ACM, 1991-1995. <http://doi.org/10.1145/2858036.2858487>.
27. Seongkook Heo, Christina Chung, Geehyuk Lee, and Daniel Wigdor. 2018. 雷神之锤。一个利用螺旋桨诱导的推进力的无接地力反馈装置。《2018年CHI计算系统中人的因素会议论文集》, 525:1--525:11. <http://doi.org/10.1145/3173574.3174099>
28. Jaeyeon Jaeyeon Lee, Mike Sinclair, Mar Gonzalez-Franco, Eyal Ofek, and Christian Holz. 2019. TORC: 用于手部高灵巧手指交互的虚拟现实控制器。《2019年CHI计算系统中人的因素会议论文集》.
29. SungKu Kang, HyunKi In, and Kyu-Jin Cho. 2012. 肌腱驱动设备的被动制动机制的设计. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 13, 8, 1487-1490.
30. Rebecca P Khurshid, Naomi T Fitter, Elizabeth A Fedalei, and Katherine J Kuchenbecker. 2017. 握力、接触和加速度反馈对远程操作的拾取和放置任务的影响。《IEEE触觉交易》10, 1, 40-53.
31. CyberGlove Systems LLC. CyberGrasp. *CyberGlove Systems LLC*. 2018年9月6日, 从<http://www.cyberglovesystems.com/cybergasp/>
32. Karon E MacLean, Michael J Shaver, and Dinesh K Pai. 2002. 手持式触觉技术。一个具有力感应的USB媒体控制器。《第10届虚拟环境和远程操作系统触觉接口研讨会论文集. Haptics 2002, IEEE, 311-318.
33. Thomas H Massie和J Kenneth Salisbury. 1994. 幻影触觉界面。用于探测虚拟物体的装置。《ASME冬季年会论文集, 虚拟环境和远程操作系统的触觉界面研讨会, Citeseer, 295-300.
34. Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. 2007. 重力抓取器: 可穿戴的触觉显示器以呈现虚拟质量感。《ACM SIGGRAPH 2007新兴技术》. ACM. <http://doi.org/10.1145/1278280.1278289>
35. Jun Murayama, Laroussi Bougrila, YanLin Luo, et al. 2004. SPIDAR G&G: 一个用于双臂VR交互的双手触觉界面. *EuroHaptics* 论文集, Citeseer, 138-146.
36. Martin Murer, Bernhard Maurer, Hermann Huber, Ilhan Aslan, and Manfred Tscheligi. 2015. 扭力屏。用于手持设备中未接地的触觉反馈的致动飞轮。《第九届有形、嵌入式和具身交互国际会议论文集, ACM, 161-164.
37. D. Prattichizzo, F. Chinello, C. Pacchierotti, and M. Malvezzi. 2013. 迈向指尖触觉的可穿戴性。一个用于皮肤力反馈的3-DoF可穿戴设备。《IEEE Transactions on Haptics》6, 4, 506-516. <http://doi.org/10.1109/TOH.2013.53>
38. Domenico Prattichizzo, Francesco Chinello, Claudio Pacchierotti, and Monica Malvezzi. 2013. 实现指尖触觉的可穿戴性。一个用于皮肤力反馈的3-DoF可穿戴设备。《IEEE Transactions on Haptics》6, 4, 506-516. <http://doi.org/10.1109/TOH.2013.53>
39. Carlos Rossa, José Lozada, and Alain Micaelli. 2014. 用于触觉设备的双单向刹车混合驱动系统的设计和控制。《IEEE触觉交易》7, 4, 442-453.
40. Timothy M Simon, Ross T Smith, and Bruce H Thomas. 2014. 用于虚拟环境触觉的可穿戴干扰手套。《2014年ACM可穿戴计算机国际研讨会论文集, ACM, 67-70.
41. Massimiliano Solazzi, Antonio Frisoli, and Massimo Bergamasco. 2010. 用于改善虚拟物体触觉探索的皮肤指尖显示器的设计。《第19届机器人与人类互动交流国际研讨会, IEEE, 1-6.
42. Bernhard Spanlang, Jean-Marie Normand, David Borland, et al. 2014. 如何建立一个体现实验室。在虚拟现实实现身体表现的幻觉。《机器人学和人工智能前沿》11, 11, 1-22. <http://doi.org/10.3389/frobt.2014.00009>
43. Evan Strasnick, Christian Holz, Eyal Ofek, Mike Sinclair, and Hrvoje Benko. 2018. Haptic Links: 使用可变刚度驱动虚拟现实的双手触觉。《2018年CHI计算机系统中人的因素会议论文集》, 644: 1-644:12. <http://doi.org/10.1145/3173574.3174218>
44. Colin Swindells, Alex Unden, and Tao Sang. 2003. TorqueBAR: 一个未接地的触觉反馈装置。《第五届多模态界面国际会议论文集, ACM, 52-59.
45. Dzmitry Tsetserukou, Shotaro Hosokawa, and Kazuhiko Terashima. 2014. LinkTouch: 一种具有五杆联动机制的可穿戴式触觉设备, 用于在指板上呈现双DOF力反馈。《2014年IEEE触觉研讨会 (HAPTICS)》, IEEE, 307-312.
46. Bogdan Vigar, James Sulzer, and Roger Gassert. 2015. 设计和评估一个电缆驱动的fMRI-兼容的触觉界面, 以研究精确的抓握控制。《IEEE交易触觉》9, 1, 20-32.
47. Julie M Walker, Heather Culbertson, Michael Raitor, and Allison M Okamura. 2018. 使用两个平行的双平衡控制矩陀螺仪的触觉方向引导。《IEEE触觉交易》11, 2, 267-

278.

48. Eric Whitmire, Hrvoje Benko, Christian Holz, Eyal Ofek, and Mike Sinclair. 2018. Haptic Revolver: 在可重新配置的虚拟现实控制器上进行触摸、剪切、纹理和形状渲染。《2018年CHI 计算机系统中人的因素会议论文集》, 86:1-86:12。 <http://doi.org/10.1145/3173574.3173660>
49. Andre Zenner, Antonio Kruger, A. Krüger, Antonio Kruger, and A. Krüger. 2017. Shifty: 一个移重的动态被动触觉代理, 以增强虚拟现实中的物体感知。《IEEE 视觉化和计算机图形交易》23, 4, 1285-1294。 <http://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2656978>
50. Yuhang Zhao, Cynthia L Bennett, Hrvoje Benko, et al. 2018. 让视觉障碍者能够用触觉和听觉的手杖模拟来导航虚拟现实。《2018年CHI 计算系统中人的因素会议论文集》, ACM。 116:1--116:14。 <http://doi.org/10.1145/3173574.3173690>
51. Igor Zubrycki 和 Grzegorz Granosik. 2017. 使用干扰原理的新型触觉装置, 用于在基于手套的控制界面中提供动觉反馈。《智能与机器人系统杂志》85, 3-4, 413-429。
52. 2018. DextrES: 通过薄型静电制动器在VR中抓取的可穿戴触觉反馈。ACM。